Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 16, No. 5, Dec- Jan 2021, p. 507-523

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 16، شماره 5، آذر - دی 1399، ص. 523-507

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی زالزالک (*Crataegus pinnatifida*) طی نگهداری در شرایط مختلف و مدل‌سازی تغییرات با مدل‌های سینتیکی

محسن زندی[*1]- علی گنجلو[2]- ماندانا بی‌مکر[2]

تاریخ دریافت: 1398/06/10
تاریخ پذیرش: 1398/09/10

چکیده

شرایط نگهداری نامناسب منجر به کاهش کیفیت قابل توجه زالزالک می‌گردد که بر پذیرش نهایی مصرف کننده موثر است. تاکنون پژوهشی مبنی بر بررسی تاثیر شرایط نگهداری بر تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی میوه زالزالک گزارش نشده است. در پژوهش حاضر تغییرات در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مرتبط با کیفیت میوه طی نگهداری زالزالک تحت شرایط مختلف نگهداری (محیط، یخچالی و سردخانه) مورد ارزیابی قرار گرفت؛ سپس پنج مدل سینتیکی (مدل‌های درجه صفر، درجه اول، درجه دوم، تبدیل جزء و ویبال) بر داده‌های تجربی برازش گردید و پارامترهای مدل توسط تحلیل رگرسیونی محاسبه گردید. شرایط و زمان نگهداری تاثیر معناداری بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی (به‌غیر از برخی خصوصیات هندسی) داشت و تغییرات قابل توجهی در رنگ، سفتی بافت و افت وزن زالزالک رخ داد. سفتی بافت، اسیدیته قابل تیتر، pH، شاخص رسیدگی، خصوصیات رنگی (به غیر از خصیصه‌های a^* و c^*) به‌طور معناداری کاهش یافت و افت وزن، میزان مواد جامد محلول و خصیصه‌های a^* و c نیز به‌طور معناداری افزایش پیدا نمودند. نتایج نشان داد که مدل‌های سینتیکی درجه اول و ویبال بهترین توصیف را از تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نشان دادند. وابستگی دمایی کیفیت میوه به شرایط نگهداری به‌طور موفقیت آمیزی توسط معادله آرنیوس توصیف گردید. خروجی این پژوهش نتایج مفید و ارزشمندی برای شرایط و نحوه نگهداری زالزالک فراهم می‌آورد.

واژه‌های کلیدی: زالزالک، شرایط نگهداری، مدل‌سازی سینتیکی، مدل آرنیوس، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی

مقدمه

امروزه در دنیا توجه ویژه به میوه‌ها و سبزی‌های بومی به سبب خواص دارویی و تغذیه‌ای افزایش یافته است. ایران نیز به سبب موقعیت و شرایط آب و هوایی جزء مناطق اصلی با تنوع گیاهی بالا در دنیا می‌باشد و محصولات باغی و جنگلی منحصربفردی دارد؛ زالزالک یکی از محصولات ویژه با سطح بارور حدود 305 هکتار و تولید 891 تن است (Derili gharjalar, Hassanpour, & Farokhzad, 2017). زالزالک (*Crataegus pinnatifida*) متعلق به خانواده گل‌سرخیان[3] و از جنس زالزالک (*Crataegus*) می‌باشد (Liu *et al*., 2016). این میوه با حدود 280 گونه به‌طور گسترده‌ای در مناطق معتدل نیم‌کره شمالی به‌خصوص در آسیای شرقی، اروپا و آمریکای شمالی به‌طور وحشی می‌رویند (Zhang *et al*., 2002). این میوه یکی از پرمصرف‌ترین محصولات باغی در جهان است که هم به صورت تازه و هم به صورت فرآوری شده (مربا، نوشیدنی الکلی، ژله و غیره) استفاده می‌گردد. زالزالک به سبب عطر و طعم عالی، رنگ جذاب و محتوای بالای مواد مغذی و ریزمغذی به‌عنوان جزء مهم بسیاری از محصولات غذایی فراوری شده است (Li *et al*., 2015). خواص دارویی زیادی از گیاه زالزالک خصوصاً در درمان نارسایی‌های قلبی گزارش شده است. به‌طوری‌که از میوه این گیاه به‌عنوان داروی گیاهی رایج در درمان بیمارهای قلبی استفاده می‌شود (Derili gharjalar *et al*., 2017; Froehlicher *et al*., 2009; Pittler *et al*., 2003; Tankanowa *et al*., 2003). همچنین گزارشاتی مبنی بر استفاده از زالزالک برای جلوگیری از رشد سلول‌های سرطانی (Rodrigues *et al*., 2012)، کاهش کلسترول و چربی خون (Zhang *et al*., 2002)، کاهش اسهال و خونریزی قاعدگی (Ozcan *et al*., 2005)، کاهش سنگ کلیه و مدر (Rigelsky & Sweet, 2002)، تغییر آنزیم‌های معده و متابولیسم کلسترول در کبد (Kwok *et al*., 2010) و کاهش التهاب (Salam *et al*., 2012) وجود دارد.

برداشت زالزالک در گونه‌های وحشی در فصل پاییز (مهر و آبان) صورت می‌پذیرد (Ozcan *et al*., 2005). با این حال پیش و پس از

1 و 2- به‌ترتیب استادیار و دانشیار، گروه علوم و مهندسی صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان.
(*- نویسنده مسئول: Email: zandi@znu.ac.ir)
DOI: 10.22067/ifstrj.v16i5.79355
3 *Rosaceae*

برداشت میوه‌ها و سبزی‌ها، عوامل متعددی بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، ارزش غذایی و میزان ترکیبات زیست فعال ارزشمند آنها موثر است (Kirakosyan *et al*., 2003; Li *et al*., 2015)، ارزیابی کیفی میوه‌ها و سبزی‌ها به سبب پیوند خوردن با خواص فیزیکی و شیمیایی بسیار پیچیده است و عمدتاً تابع زمان و شرایط نگهداری است (Nordey *et al*., 2014). به‌طور کلی کیفیت میوه و سبزی و عمر انبارمانی آن را می‌توان با بررسی و کنترل برخی خصوصیات مهم نظیر شرایط برداشت (نحوه و زمان برداشت و درجه رسیدگی میوه)، دما و رطوبت نگهداری میوه و سبزی، شرایط فیزیکی و شیمیایی نگهداری افزایش داد (Rop *et al*., 2011; Ashournezhad & Ghasemnezhad, 2012). برای بررسی این تغییرات طی نگهداری نیاز به آزمون‌های مختلفی وجود دارد. از آنجایی‌که انجام بسیاری از آزمون‌ها بسیار هزینه‌بر و وقت‌گیر است (Jahangiri-Saleh *et al*., 2017). در نتیجه در سال‌های اخیر مطالعات سینتیکی کاهش کیفیت محصولات غذایی و نیز تخریب ریزمغذی‌ها طی نگهداری مورد توجه بیشتری قرار گرفته است (Hashim *et al*., 2012). مدل‌سازی سینتیکی کاهش کیفیت یک مرحله مهم برای کنترل و پیش‌بینی تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی طی نگهداری میوه‌ها و سبزی‌ها می‌باشد (Remini *et al*., 2015). از مدل‌های سینتیکی می‌توان به‌عنوان ابزاری جهت توصیف تغییرات کمی فیریکی و شیمیایی، بیوشیمیایی و تغذیه‌ای در تحقیقات غذایی استفاده کرد (Dhakala *et al*., 2018).

متاسفانه میوه‌های بومی ایران نظیر زالزالک با آنکه دارای پتانسیل بالایی برای تولید و فراوری هستند؛ ولی هیچ برنامه‌ریزی مشخصی برای تولید انبوه و صنعتی آن وجود ندارد؛ با وجود سابقه طولانی استفاده از زالزالک به‌عنوان میوه خوراکی و نیز در کاربردهای دارویی (Liu *et al*., 2010)، با این حال تحقیقات اندکی درباره آن انجام شده است و تاکنون پژوهشی مبنی بر بررسی تاثیر شرایط نگهداری بر تغییرات فیزیکی و شیمیایی میوه زالزالک گزارش نشده است. از اینرو هدف از پژوهش حاضر اولاً ارزیابی تغییرات هندسی، فیزیکی شامل ویژگی‌های بافتی و رنگی، شیمیایی شامل مواد جامد کل، اسیدیته قابل تیتر و شاخص رسیدگی زالزالک طی نگهداری است. ثانیاً مدل‌سازی سینتیکی تغییرات کیفی زالزالک طی نگهداری به مدت بیست روز در شرایط مختلف (سردخانه، یخچال و محیط) می‌باشد. به این منظور از مدل‌های سینتیکی مختلفی جهت مدل‌سازی تغییرات فیزیکی و شیمیایی و پیش‌بینی این تغییرات استفاده گردید. نوآوری این پژوهش بررسی تغییرات زالزالک تحت شرایط مختلف نگهداری (محیط، یخچالی و سردخانه) است تا علاوه بر یافتن بهینه شرایط نگهداری، امکان یافتن عمر انبارمانی این میوه بومی فراهم می‌آید. با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان زالزالک را به عنوان یکی از میوه‌های بومی ایران معرفی نمود و امکان توسعه کشت و نیز فراوری و نگهداری آن را فراهم نمود.

مواد و روش‌ها

تهیه زالزالک و اعمال تیمارهای مختلف

برای بررسی اثر شرایط نگهداری بر درجه کیفی میوه زالزالک (*Crataegus pinnatifida*) طی نگهداری در شرایط استاندارد تجاری (دمای 1 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 90 درصد) (Razavi *et al.*, 2018)، یخچالی (دمای 10-8 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 85 درصد) و محیط (دمای 25 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی 60 درصد) میوه‌های با درجه رسیدگی مناسب (یعنی میزان مواد جامد محلول[1] (TSS) حدود 5 (Razavi *et al*., 2018) تهیه گردید. میوه‌ها از باغات شرکت میثاق امداد (استان گیلان) برداشت گردید و زالزالک‌های با شکل، رنگ، اندازه و درجه رسیدگی مشابه در سه گروه مجزا به مدت 20 روز در سه شرایط فوق نگهداری گردید. نمونه‌برداری با حداقل 10 تکرار هر 5 روز یکبار و به‌صورت تصادفی انجام پذیرفت.

آزمون‌های فیزیکی و شیمیایی

افت وزن (WL) نمونه‌ها از تغییرات وزن نسبت به وزن اولیه حداقل 50 زالزالک به‌دست آمد. تغییرات وزن با کمک ترازوی دیجیتال با دقت 0/01 گرم (HL-I ،AND، ژاپن) و طی دوره‌های 5 روزه اندازه‌گیری شد (Ashournezhad & Ghasemnezhad, 2012). سفتی بافت (F) با استفاده از آزمون نفوذ و با کمک دستگاه تست بافت (کوپا، ایران) مجهز به پلانجر با قطر 3 میلی‌متری با سرعت نفوذ و حداکثر عمق نفوذ به‌ترتیب برابر 0/5 میلی‌متر بر ثانیه و 6 میلی‌متر انجام پذیرفت. شاخص شکلی نیز با استفاده از تصاویر دیجیتال و با کمک نرم افزار متلب (R2017a، ایالات متحده آمریکا) به‌دست آمد (Ozcan et al., 2005; Li et al.,2015).

$$MDC = (D_0 - D_1) \times (D_0)^{-1} \times 100 \quad (1)$$

$$Dg = (L \times D^2)^{0.33} \quad (2)$$

$$\varphi = (L \times D^2)^{0.33} \times L^{-1} \quad (3)$$

که D، L، MDC، D_0، D_1، Dg و φ به‌ترتیب مقدار قطر اصلی، طول میوه، تغییرات قطر اصلی، قطر اولیه، قطر ثانویه قطر میانگین هندسی و ضریب کرویت است. دیجیتال (با فرمت TIFF) با استفاده از دوربین کانن (70D، ساخت ژاپن) با لنزی با زوم بین 55-18

1 Total soluble solid (TSS)

میلی‌متری (کانن، ژاپن) ثبت گردید. پس از پردازش تصاویر (حذف نویز و تبدیل محیط RGB به مختصات CIELab) با استفاده از نرم‌افزار Image j و پلاگین‌های آن (نسخه 1/52، موسسه ملی بهداشت، ایالات متحده آمریکا) خصیصه‌های L^*، a^* و b^* استخراج شد و سایر خصیصه‌ها شامل خلوص رنگ یا کروما[1] (رابطه 4)، تغییرات رنگی (رابطه 5) و زاویه رنگ[2] (رابطه 6) نیز محاسبه گردید (Cardenas-Perez *et al.*, 2017; Arzate-Vazquez *et al.*, 2011).

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{0.5} \quad (4)$$

$$\Delta E = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{0.5} \quad (5)$$

$$h^* = \arctan(b^* / a^*) \quad (6)$$

پس از آب‌گیری زالزالک و صاف کردن آب آن، میزان مواد جامد محلول (TSS) و pH به‌ترتیب با کمک رفراکتومتر دستی (آتاگو، H50، ژاپن) و pHمتر (هانا ایتالیا، HI2211) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری اسیدیته قابل تیتر[3] (TA) نیز با روش AOAC و از طریق تیتراسیون توسط هیدروکسید سدیم 0/1 نرمال انجام پذیرفت (Helrich, 1990) (Li *et al.*, 2015). با داشتن برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی شاخص رسیدگی (RPI)[4] از معادله 7 محاسبه گردید (Vélez-Rivera *et al.*, 2014):

$$RPI = \ln(100\times|F|\times (TA/TSS)) \quad (7)$$

مدل‌سازی ریاضی و پیش‌بینی خصیصه‌های فیزیکی و شیمیایی

مدل‌سازی در حقیقت استفاده از روابط و معادلات به‌جای انجام تجربی آزمون‌ها می‌باشد. در این پژوهش برای فهمیدن ارتباط کمی بین زمان و دمای نگهداری با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مختلف زالزالک، رفتار داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های سینتیکی مختلف توصیف گردید. با الهام از پژوهش‌های پیشین (Nannyonga *et al.*, 2016; Avila & Silva, 1999; Chen & Ramaswamy, 2002; Gupte *et al.*, 1964; Nisha *et al.*, 2005; Shin *et al.*, 2007, Weemaes *et al.*, 1999) مدل‌های سینتیکی مختلفی برای این تحقیق انتخاب گردید. معمولاً سینتیک تغییرات کیفی در میوه و سبزی‌ها از سه معادله سنتیکی درجه صفر (رابطه 8)، درجه اول (رابطه 9) و درجه دوم (رابطه 10) تبعیت می‌نماید (Labuza, 1979; Nannyonga *et al.*, 2016).

$$C_t = C_0 + [k_{ZO} \times t] \quad (8)$$

$$C_t = C_0 \times \exp[-k_{FO} \times t] \quad (9)$$

$$C_t = ((C_0) / (1 + C_0 \times k_{SO} \times t) \quad (10)$$

که C_t مقدار پارامتر کیفی در زمان t، C_0 نیز مقدار اولیه پارامتر کیفی در زمان صفر و k_{ZO}، k_{FO} و k_{SO} به‌ترتیب برابر ثابت سرعت درجه صفر، درجه یک و درجه دو (مثبت یعنی رشد نمایی ایزوترم و منفی یعنی کاهش نمایی ایزوترم) بر حسب S^{-1} است. با بدست آوردن ثابت نرخ تغییر پارامتر از معادله درجه اول (k_{FO}) نیمه عمر نگهداری محصول ($t_{1/2}$) بر اساس هر کدام از خصیصه‌های فیزیکی محاسبه گردید (Remini *et al.*, 2015; Chowdhury *et al.*, 2011)

$$t_{1/2} = \ln(2) / k_{FO} \quad (11)$$

دو معادله سینتیکی دیگر یعنی تبدیل جزء[5] (رابطه 12) و ویبال (رابطه 13) نیز برای برازش داده‌های تجربی استفاده شد (Levenspiel, 1972; Corradini & Peleg, 2007).

$$C_t = C_\infty + (C_0 - C_\infty) \times \exp[-k \times t] \quad (12)$$

$$C_t = C_0 \times \exp[-k \times t^n] \quad (13)$$

که C_∞ مقدار تعادلی شاخص کیفی در نمونه نهایی و n فاکتور شکلی یا درجه واکنش می‌باشد. انتخاب بهترین مدل با کمک ضریب تبیین (R^2) بین مقدار واقعی با مقدار پیش‌بینی شده، ریشه میانگین مربعات خطا[6] (RMSE) و نیز میانگین مربعات خطا[7] (MSE) انجام شد.

معادله آرنیوس قابل قبول‌ترین عبارت برای محاسبه تأثیر دما بر ثابت‌های سرعت سینتیکی در سیستم‌های غذایی است. با کمک معادله آرنیوس ارتباط ثابت سینتیکی تخریب کیفی (k) با دمای مطلق فرآیند بر حسب کلوین (T) بررسی گردید (Pinheiro *et al.*, 2002; Nannyonga, 2016; Bakalis *et al.*, 2016)

$$k = k_{ref} \times \exp[-(E_a / R) \times (T^{-1} - T_{ref}^{-1})] \quad (14)$$

1 Chroma
2 Hue angle
3 Titratable acidity (TA)
4 Ripening index (RPI)
5 Fractional conversion model
6 Root mean squared error
7 Mean square error (MSE)

که E_a و R به ترتیب برابر انرژی فعال‌سازی (بر حسب ژول بر مول) و ثابت جهانی گازها (برابر 8/4531 ژول بر مول کلوین) است. k_{ref} ثابت آرنیوس در دمای مرجع (T_{ref}) می‌باشد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

تجزیه و تحلیل آماری تاثیر زمان و شرایط نگهداری بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (RCBD) انجام گرفت که در آن رطوبت به‌عنوان بلوک و دما و زمان نگهداری به‌عنوان تیمار در نظر گرفته شد. نرم‌افزار SPSS (نسخه 24، ایالات متحده آمریکا) جهت انجام آنالیز آماری استفاده گردید و در صورت معناداری اختلافات بین تیمارها ($p<0.05$) از آزمون دانکن به‌عنوان آزمون تعقیبی برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد. رسم نمودارها با کمک نرم‌افزار اکسل نسخه 2016 و محاسبه نوار خطا با کمک نرم‌افزار SPSS (نسخه 24، ایالات متحده آمریکا) انجام پذیرفت و آزمون‌ها حداقل در سه تکرار انجام شدند. از نرم‌افزار متلب (نسخه 2017، ایالات متحده آمریکا) و جعبه ابزار برازش منحنی جهت برازش مدل‌های سینتیکی بر داده‌های تجربی و یافتن ضرایب و ثابت‌های مدل استفاده گردید.

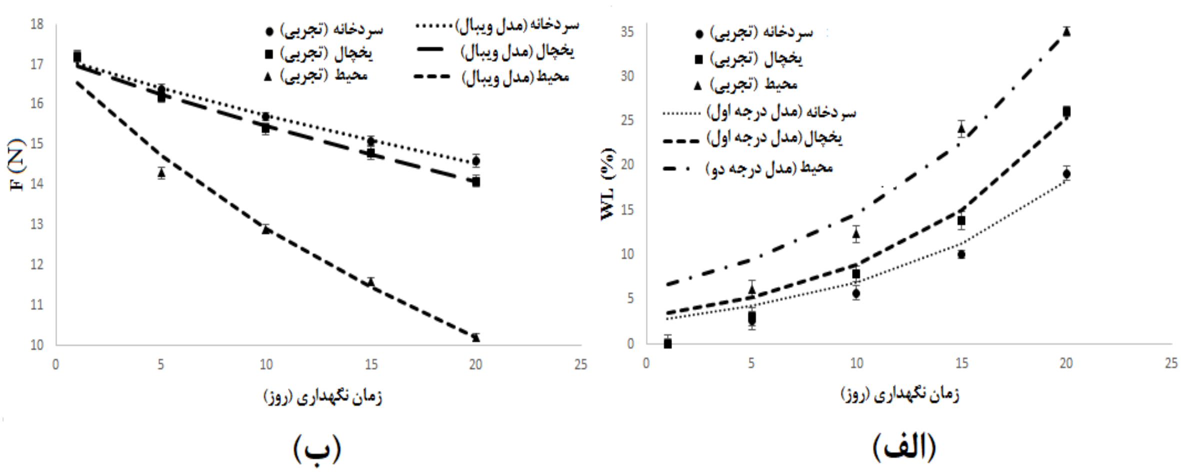
نتایج و بحث

در تمامی نتایج و بحث‌ها نمودار روند تغییرات به همراه بهترین مدل سینتیکی برازش شده بر آن نشان داده شده است. پس از بررسی‌های انجام شده از تغییرات، در نهایت مدل‌سازی سینتیکی انجام و بهترین مدل انتخاب می‌گردد.

خصوصیات فیزیکی

خصوصیات فیزیکی به سبب ارتباط با کیفیت حسی و اثر بر مرحله رسیدگی و کیفیت میوه طی نگهداری (محمدی و همکاران، 2015) دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشند. همان‌طور که در شکل 1-الف مشاهده می‌گردد، میزان افت وزن با افزایش زمان نگهداری بیشتر می‌گردد؛ به‌طوری‌که میزان این ویژگی در روز بیستم نگهداری برای شرایط نگهداری تجاری، یخچالی و در محیط به‌ترتیب برابر 19/17، 26/11 و 35/11 درصد است. نتایج مشابهی از این روند تغییرات برای سایر میوه‌ها گزارش گردیده است (Ashournezhad & Ghasemnezhad, 2012; Rivera *et al*., 2014; Vélez-Rivera *et al*., 2014). طی نگهداری در شرایط محیط به سبب دمای بالاتر (25 درجه سانتی‌گراد) و رطوبت نسبی پایین‌تر (60 درصد) میزان از دست دادن رطوبت و به دنبال آن افت وزن نزدیک به دو برابری نسبت به شرایط نگهداری تجاری مشاهده گردید. از آنجایی‌که ارتباط مستقیم و تنگاتنگی بین افت رطوبت و کاهش کیفی میوه و سبزی وجود دارد (Billy *et al*., 2008)؛ از اینرو نگهداری در شرایط تجاری سبب می‌گردد که کیفیت نهایی میوه بهتر حفظ گردد (Paull, 1999; Guadarrama & Andrade, 2012).

میزان سفتی بافت زالزالک طی بیست روز نگهداری تغییر معناداری نمود ($p < 0.05$)؛ به طوری‌که از مقدار اولیه 17/2 نیوتن برای شرایط نگهداری تجاری، یخچالی و در محیط به‌ترتیب به مقدار 14/6، 14/1 و 10/4 تغییر یافت. این نرم شدن بافت میوه در کنار افت رطوبت، می‌تواند به سبب تجزیه پکتین و همی‌سلولز و یا فعالیت آنزیم‌های تجزیه کننده کربوهیدرات‌ها باشد (Guadarrama & Andrade, 2012; Gordon & Barrett, 2012).

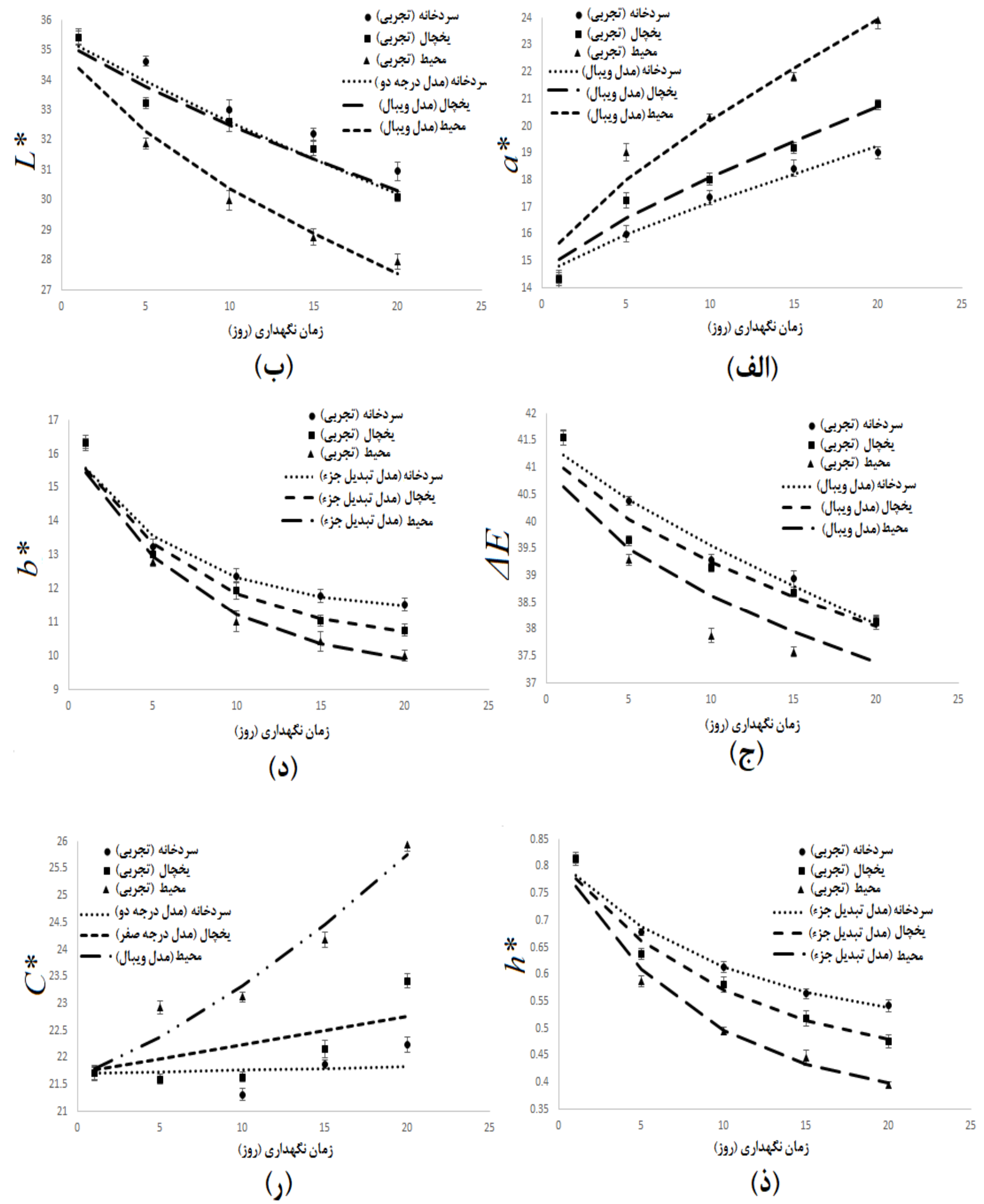


شکل 1- مدل‌سازی سینتیکی تاثیر زمان و شرایط نگهداری زالزالک بر تغییرات (الف) افت وزن و (ب) بافت.

با مقایسه شرایط مختلف نگهداری زالزالک (شکل 2-ب) مشخص گردید که تفاوت معناداری ($p<0.05$) بین سفتی بافت زالزالک نگهداری شده در شرایط سردخانه و یخچالی طی بیست روز وجود ندارد و این در حالی است که زالزالک‌های‌ نگهداری شده در محیط به‌طور معناداری ($p<0.05$) نرم‌تر می‌باشند. این یافته با نتایج تغییرات افت وزن نیز مطابقت دارد. نرم شدن بافت طی نگهداری و رسیدگی آواکادو (Arzate-Vazquez *et al.*, 2011)، سیب (Cardenas-Perez *et al.*, 2017)، انبه (Vélez-Rivera *et al.*, 2014)، گوجه‌فرنگی (Wan *et al.*, 2018) و خرمالو (Mohammadi *et al.*, 2015) توسط سایر محققان گزارش گردیده است.

خصیصه‌های رنگی میوه زالزالک طی نگهداری در شرایط مختلف در شکل 2 نشان داده شده است. خصیصه L^* ویژگی ارزیابی رنگی مهمی است که شاخصی از روشنایی رنگ است (بین 0 تا 100) (Li *et al.*, 2015). همان‌طور که در شکل 2-ب مشاهده می‌شود، این خصیصه در طول دوره نگهداری در هر سه شرایط به‌طور معناداری ($p < 0.05$) کاهش می‌یابد. همچنین زالزالک‌های نگهداری شده در سردخانه و یخچال پس از بیست روز از نظر این خصیصه باهم تفاوت معنادارای ($p<0.05$) ندارند. درحالی‌که نمونه‌های نگهداری شده در محیط بعد از بیست روز بطور معناداری ($p<0.05$) تیره‌تر هستند. این امر احتمالاً به سبب افزایش فعالیت آنزیم پلی‌فنل اکسیداز است (Ashournezhad & Ghasemnezhad, 2012, Vélez-Rivera *et al.*, 2014)، که در دمای محیط بیشتر است. علاوه بر آن رشد لکه‌های قهوه‌ای در سطح میوه که به سبب فساد قارچی میوه است، می‌تواند دلیل دیگری برای این کاهش باشد (Vélez-Rivera, *et al.*, 2014). خصیصه a^* نشان دهنده قرمزی (مقادیر مثبت) و سبزی (مقادیر منفی) نمونه است (Li *et al.*, 2015) و افزایش معنادار آن ($p<0.05$) طی نگهداری و در دماهای مختلف به سبب قرمزتر شدن رنگ میوه است. خصیصه‌های b^* نیز که نشان‌دهنده و شاخص رنگ زرد است. مقدار این خصیصه بطور معناداری ($p<0.05$) از روز اول تا روز بیستم کاهش یافت؛ به‌طوری‌که از مقدار اولیه 16/31 به مقدار 11/54، 10/76 و 10/01 به‌ترتیب در شرایط تجاری، یخچالی و در محیط رسید. تغییرات مشابهی از ازگیل ژاپنی (Ashournezhad & Ghasemnezhad, 2012) و انبه (Vélez-Rivera *et al.*, 2014) نیز توسط سایر محققان گزارش شده است. زاویه رنگ نزدیک به 0 درجه نشان‌دهنده رنگ قرمز و نارنجی، نزدیک به 90 درجه نشان‌دهنده رنگ زرد، نزدیک به 180 درجه نشان‌دهنده رنگ خاکستری-سبز و نزدیک به 270 درجه نشانگر رنگ آبی است (Derili gharjalar *et al.*, 2017). همانطور که مشاهده می‌شود زاویه رنگ در هر سه شرایط نگهداری از روز اول تا روز بیستم به‌طور معناداری ($p<0.05$) کاهش یافت و به صفر درجه نزدیک شد که این نشان‌دهنده افزایش رنگ قرمزی و کاهش رنگ زردی است. این روند به‌طور معناداری ($p<0.05$) در شرایط محیط نسبت به یخچالی و یخچالی نسبت به سردخانه شدت بیشتری داشت که نشان‌دهندهٔ توسعه بیشتر رنگ قرمز و رسیدگی با سرعت بیشتر در دمای محیط است. همانطور که در شکل 2-ر مشاهده می‌گردد، کروما که نشان‌دهنده شدت رنگ یا خلوص رنگ است (Derili gharjalar *et al.*, 2017) طی نگهداری در سردخانه تغییر معناداری ($p<0.05$) نداشت؛ ولی در دمای یخچالی و محیط مقدار آن در روزهای نزدیک به روز بیستم نگهداری به‌طور معناداری ($p<0.05$) افزایش یافت. روند مشابهی برای تغییرات رنگ (ΔE) نیز مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که در روزهای منتهی به روز بیستم نگهداری تغییرات رنگ در هر سه شرایط نگهداری به‌طور معناداری ($p<0.05$) کاهش یافت ولی نسبت به یکدیگر تغییر معناداری ($p<0.05$) نداشت. خصیصه‌های شکلی محصولات کشاورزی مهمترین ویژگی‌ها در طراحی سیستم‌های نگهداری، درجه‌بندی، انتقال، فراوری و بسته‌بندی است (Khoshnam *et al.*, 2007). نتایج بررسی تغییرات خصیصه‌های هندسی طی نگهداری زالزالک در شرایط مختلف در جدول 1 نشان داده شده است. همانطور که در جدول مشاهده می‌گردد، طول میوه (L) و نسبت طول به قطر (L/D) طی مدت نگهداری در هر سه شرایط تغییر معناداری ($p<0.05$) نداشت و این درحالی است که قطر اصلی (D) طی نگهداری به‌طور معناداری ($p<0.05$) کاهش یافت؛ به‌طوری‌که در فاصله بیست روز نگهداری تغییرات قطر اصلی (MDC) برای شرایط نگهداری در سردخانه، یخچالی و در محیط به‌ترتیب 3/86، 3/89 و 7/73 درصد بود. قطر میانگین هندسی (Dg) و ضریب کرویت (φ) دیگر خصیصه‌های اندازه‌گیری شده طی نگهداری زالزالک بود؛ قطر میانگین هندسی (Dg) با گذشت زمان نگهداری در هر سه شرایط نگهداری به‌طور معناداری ($p<0.05$) کاهش پیدا کرد؛ در حالی‌که تغییرات ضریب کرویت تنها در شرایط نگهداری یخچالی و سردخانه معنادار ($p<0.05$) بود. بررسی خصوصیات هندسی و فیزیکی میوه و سبزی‌های مختلف مانند خرمالو (محمدی و همکاران، 2015)، انار (Khoshnam *et al.*, 2007)، میوه کاپر (کاپاریس یا هندوانه کوهی)[1] (Sessiz *et al.*, 2007)، سیب‌زمینی (Singh *et al.*, 2006) و هلو (Wang, 2004) توسط سایر محققان گزارش شده است. نتایج بررسی‌های هندسی نشان داد که خصیصه‌های هندسی شاید شاخص‌های بسیار مناسبی برای بررسی تغییرات طی نگهداری زالزالک نباشد.

1 Caper fruit



شکل 2- مدل‌سازی سینتیکی تاثیر زمان و شرایط نگهداری ازگیل بر تغییرات (الف) a^*، (ب) L^*، (ج) ΔE، (د) b^*، (ذ) h^* و (ر) C^*.

جدول 1- برخی از خصوصیات هندسی میوه زالزالک طی شرایط مختلف نگهداری.

شرایط نگهداری	زمان نگهداری (روز)	D	Le	Le/D	MDC	Dg	φ
سردخانه	0	23/3±0/2[a]	20/4±0/3[a]	0/8755±0/02[a]	0/00±0/8[a]	21/61±0/12[a]	1/059±0/004[a]
	5	23/0±0/3[a]	20/3±0/1[a]	0/8826±0/01[a]	1/29±0/6[ab]	21/39±0/24[a]	1/054±0/003[a]
	10	22/8±0/1[b]	20/1±0/3[a]	0/8816±0/03[a]	2/15±0/4[b]	21/20±0/28[ab]	1/055±0/003[a]
	15	22/6±0/3[bc]	20/0±0/2[a]	0/8850±0/01[a]	3/00±0/7[b]	21/04±0/16[b]	1/052±0/002[ab]
	20	22/4±0/1[c]	19/9±0/1[b]	0/8884±0/01[a]	3/86±0/6[c]	20/88±0/27[b]	1/049±0/003[b]
یخچالی	0	23/3±0/2[a]	20/4±0/3[a]	0/8755±0/02[a]	0/00±0/8[a]	21/61±0/12[a]	1/059±0/004[a]
	5	22/9±0/3[ab]	20/2±0/1[a]	0/8821±0/02[a]	1/72±0/4[b]	21/29±0/21[ab]	1/054±0/002[a]
	10	22/7±0/1[b]	20/1±0/1[a]	0/8855±0/01[a]	2/58±0/8[bc]	21/14±0/15[b]	1/052±0/001[b]
	15	22/5±0/2[c]	19/9±0/1[ab]	0/8844±0/01[a]	3/43±0/3[c]	20/94±0/22[b]	1/052±0/002[b]
	20	22/4±0/1[c]	19/8±0/1[b]	0/8839±0/02[a]	3/89±0/7[c]	20/85±0/18[b]	1/053±0/003[ab]
محیط	0	23/3±0/2[a]	20/4±0/3[a]	0/8755±0/02[a]	0/00±0/8[a]	21/61±0/12[a]	1/059±0/004[a]
	5	22/5±0/3[b]	19/8±0/2[ab]	0/8800±0/01[a]	3/43±0/9[b]	20/91±0/17[b]	1/056±0/002[a]
	10	22/3±0/2[bc]	19/4±0/3[b]	0/8700±0/01[a]	4/29±0/7[bc]	20/65±0/24[b]	1/064±0/003[a]
	15	21/7±0/1[c]	19/1±0/1[bc]	0/8802±0/03[a]	6/87±0/6[c]	20/17±0/17[c]	1/056±0/001[a]
	20	21/5±0/3[c]	18/9±0/1[c]	0/8791±0/03[a]	7/73±0/8[c]	19/98±0/26[c]	1/057±0/002[a]

[*]اعداد نمایش داده شده حاصل میانگین حداقل 10 تکرار مستقل± SD می‌باشند.

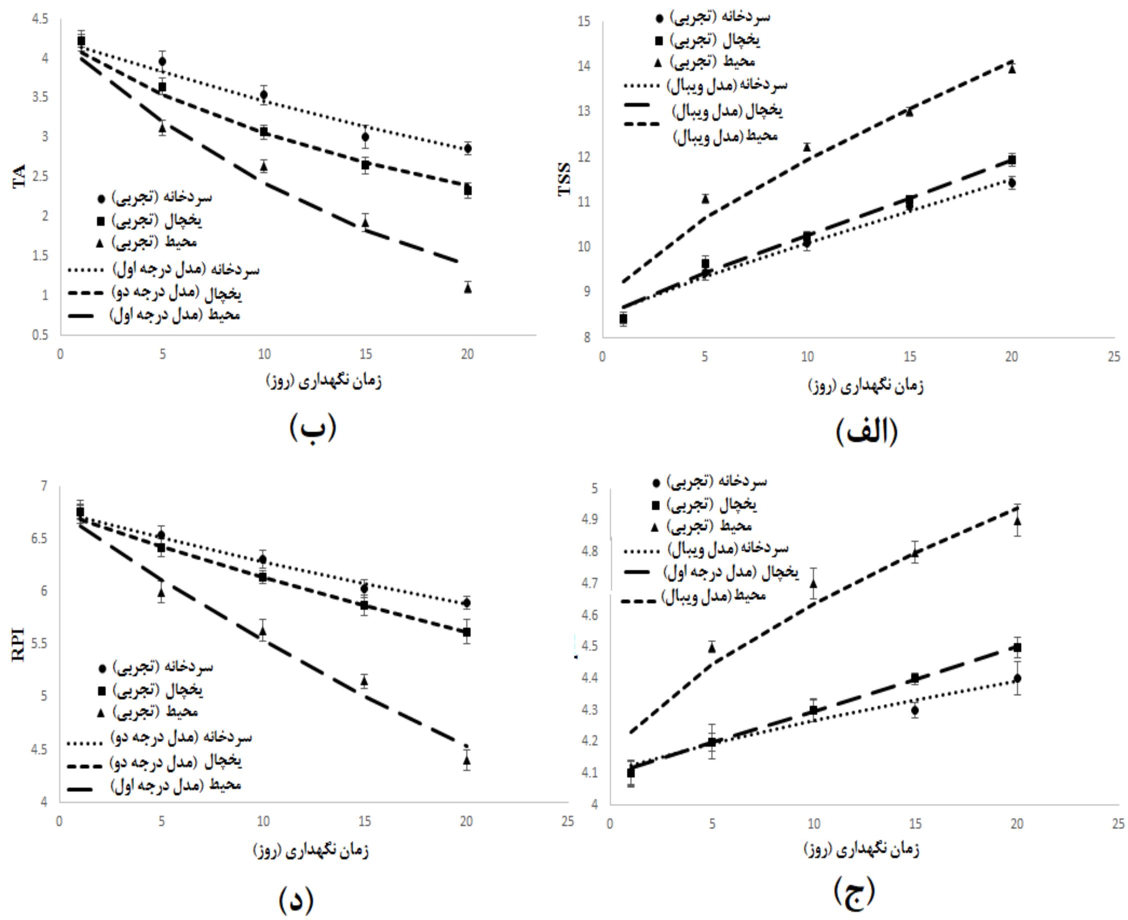
[**]اعدادی با حروف متفاوت در هر ستون از نظر آماری دارای تفاوت معنادار می‌باشند ($p<0.05$).

خصوصیات شیمیایی

تغییرات خصوصیات شیمیایی موثر بر کیفیت زالزالک طی نگهداری میوه در شرایط مختلف بررسی گردید و نتایج آن در شکل 3 ارائه شده است. طی نگهداری زالزالک میزان مواد جامد (TSS) افزایش یافت؛ بگونه‌ای که میزان مواد جامد محلول طی نگهداری در سردخانه، یخچال و محیط به‌ترتیب 35/75، 41/80 و 65/91 درصد افزایش یافت که این افزایش نسبت به روش نگهداری و زمان نگهداری معنادار ($p<0.05$) است. افزایش میزان مواد جامد محلول احتمالاً به سبب هیدرولیز نشاسته به قند طی نگهداری است که سبب بهبود طعم میوه نیز می‌گردد (Zheng *et al*., 2012; Li *et al*., 2015). این افزایش مواد جامد محلول می‌تواند به سبب محلول شدن برخی ترکیبات مانند پکتین نیز باشد (Li *et al*., 2015). کاهش میزان رطوبت (افت وزن) زالزالک طی نگهداری نیز می‌تواند از دلایل دیگر افزایش مواد جامد محلول باشد (Ashournezhad & Ghasemnezhad, 2012; Billy *et al*., 2008). علاوه بر این افزایش میزان قند که منجر به افزایش میزان مواد جامد محلول می‌گردد، می‌تواند سبب بهبود رنگ زالزالک گردد؛ چون بین محتوای آنتوسیانین و قندهای کل میوه‌های زالزالک، رابطه مثبت قابل توجهی وجود دارد (Qi *et al*., 2005).

این تغییرات در خصیصه‌های رنگی که قبلاً بیان شد، کاملاً قابل مشاهده است. نتایج نشان داد که هرچه میزان مواد جامد محلول بیشتر (در شرایط نگهداری در محیط) افزایش یابد، میزان تغییر رنگ قرمز (خصیصه a^*) بیشتر می‌گردد. تغییرات مشابهی توسط سایر محققان برای انار و سیب (Zheng *et al*., 2012) گزارش شده است. اسیدیته قابل تیتر (TA) به‌طور معناداری ($p<0.05$) با افزایش زمان نگهداری کاهش پیدا می‌کند. همچنین تاثیر روش نگهداری بر آن معنادار ($p<0.05$) است. به‌طوریکه میزان کاهش در شرایط نگهداری محیط بیشتر از (73/76 درصد) شرایط نگهداری یخچالی (44/68 درصد) و آن هم بیشتر از شرایط نگهداری در سردخانه (32/15 درصد) است. مالیک اسید، سیتریک اسید، کوینیک اسید از اسیدهای آلی اصلی زالزالک در میوه بالغ هستند که میزان کل اسیدیته قابل تیتر بسته به رقم یا درجه رسیدگی در میوه بالغ بین 3/1 تا 11/8 درصد متغیر است (Liu *et al*., 2010; Li *et al*., 2015). تغییرات pH طی نگهداری تنها در شرایط نگهداری در محیط و نیز در روز بیستم نگهداری معنادار بود. همانطور که سایر پژوهشگران نیز مشاهده کرده‌اند، اختلافات جزئی بین pH در مراحل مختلف نگهداری مشاهده شده است (Salvador *et al*., 2007; Mohammadi *et al*.,2015). در پژوهش حاضر مشاهده گردید که طی نگهداری به سبب تغییرات

رسیدگی میوه مقدار مواد جامد محلول افزایش و اسیدیته قابل تیتر کاهش می‌یابد. نتایج مشابهی توسط بسیاری از محققان دیگر برای سایر میوه‌ها و سبزی‌ها گزارش شده است (Johnson *et al*., 2011; Afsharnia *et al*., 2017; Billy *et al*., 2008; Ashournezhad & Ghasemnezhad, 2012; Vélez-Rivera *et al*., 2014; Distefano *et al*., 2009; Mohammadi *et al*., 2015; Wanitchang *et al*., 2010). نتایج فوق این حقیقت را تائید می‌نماید که روش نگهداری بر سرعت تغییرات ترکیبات شیمیایی موثر است و برخی روش‌های نگهداری نظیر نگهداری در سردخانه سبب کند شدن این تغییرات و در نتیجه افزایش عمر انبارمانی و کیفیت زالزالک می‌گردند. همانطور که در شکل 3-د مشاهده می‌شود، شاخص رسیدگی به‌طور معناداری ($p<0.05$) تحت تاثیر زمان نگهداری و شرایط نگهداری است. به‌طوری‌که میزان شاخص رسیدگی با افزایش زمان نگهداری در تمامی شرایط کاهش می‌یابد. شاخص رسیدگی در زالزالک‌های نگهداری شده در محیط به‌طور معناداری ($p<0.05$) پایین‌تر از میوه‌های نگهداری شده در شرایط یخچالی و آن هم پایین‌تر از زالزالک‌های نگهداری شده در سردخانه بود.



شکل 3- مدل‌سازی سینتیکی تاثیر زمان و شرایط نگهداری ازگیل بر تغییرات (الف) TA، (ب) TSS، (ج) RPI و (د) pH.

مدل‌سازی تغییرات خصیصه‌های فیزیکی و شیمیایی طی نگهداری با مدل‌های سینتیکی

مطالعات زیادی در مورد کاربرد سینتیک در زمینه تغییر در کیفیت مواد غذایی هنگام نگهداری و فرآوری انجام شده است (Chen & Ramaswamy, 2002). برای درک بیشتر و بهتر میزان تغییرات زالزالک طی نگهداری در شرایط مختلف از مدل‌سازی سینتیکی تغییرات استفاده گردید. برای این هدف روند این تغییرات با مدل‌های سینتیکی درجه صفر، اول، دوم، تبدیل جزء و ویبال مدل‌سازی گردید.

جدول 2- ثابت‌های مدل به‌همراه ضریب R^2 به‌دست آمده از برازش مدل‌های درجه صفر، اول، دوم، تبدیل جزئی و ویبال بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی

	شرایط نگهداری	مدل درجه صفر		مدل درجه اول		مدل درجه دوم		مدل تبدیل جزء			مدل ویبال		
		k_{ZO}	R^2	k_{FO}	R^2	K_{SO}	R^2	k_{FCO}	C_∞	R^2	k_{WO}	n	R^2
WL	سردخانه	0/62670	0/941	0/09635	0/996	0/01629	0/931	0/15682	1/8956	0/979	0/02680	1/43682	0/979
	یخچالی	0/88808	0/944	0/10484	0/996	0/01424	0/912	0/13793	1/0559	0/987	0/06939	1/16750	0/987
	محیط	1/20811	0/985	0/08729	0/982	0/00680	0/865	0/13229	0/0000	0/946	0/30466	0/16550	0/985
*L**	سردخانه	-0/22090	0/991	-0/00658	0/992	-0/00024	0/992	-0/00658	0/0010	0/992	-0/00460	1/13017	0/989
	یخچالی	-0/26756	0/948	-0/00808	0/950	-0/00024	0/953	-0/00808	0/0010	0/951	-0/01216	0/85067	0/959
	محیط	-0/47830	0/898	-0/01360	0/918	-0/00043	0/936	-0/01360	0/0010	0/918	-0/02936	0/71618	0/963
*a**	سردخانه	0/25812	0/956	0/01562	0/937	0/00095	0/914	0/01562	0/0000	0/937	0/03445	0/71711	0/977
	یخچالی	0/33821	0/935	0/01971	0/918	0/00115	0/898	0/01971	0/0009	0/918	0/04997	0/66753	0/959
	محیط	0/51658	0/910	0/02773	0/878	0/00150	0/840	0/02772	0/0000	0/878	0/08920	0/58472	0/949
*b**	سردخانه	-0/29028	0/773	-0/02158	0/815	-0/00160	0/853	-0/15760	11/296	0/975	-0/06092	0/61293	0/904
	یخچالی	-0/33295	0/817	-0/02551	0/863	-0/00194	0/901	-0/13536	10/308	0/979	-0/06246	0/66425	0/929
	محیط	-0/37902	0/815	-0/30182	0/871	-0/00239	0/915	-0/13407	9/4507	0/985	-0/06906	0/68743	0/932
ΔE	سردخانه	-0/18236	0/955	-0/00454	0/959	-0/00011	0/963	-0/00454	0/0010	0/959	-0/00750	0/81699	0/977
	یخچالی	-0/29254	0/858	-0/00484	0/865	-0/00012	0/872	-0/00484	0/0010	0/865	-0/01339	0/62808	0/936
	محیط	-0/23376	0/655	-0/00596	0/671	-0/00015	0/686	-0/00596	0/0010	0/671	-0/02178	0/52621	0/815
*h**	سردخانه	-0/01581	0/883	-0/02383	0/919	-0/03578	0/947	-0/10085	0/4968	0/988	-0/04832	0/73589	0/961
	یخچالی	-0/01917	0/886	-0/03039	0/926	-0/04786	0/954	-0/09961	0/4279	0/977	-0/05810	0/75577	0/959
	محیط	-0/02429	0/852	-0/04236	0/917	-0/07258	0/958	-0/11904	0/3574	0/982	-0/07923	0/75935	0/953
*C**	سردخانه	0/00600	0/412	0/00028	0/413	0/00001	0/413	0/00028	0/0001	0/412	0/00000	0/07708	0/566
	یخچالی	0/05266	0/984	0/00240	0/701	0/00011	0/707	0/00240	0/0010	0/701	0/000002	3/40771	0/695
	محیط	0/18915	0/938	0/00817	0/944	0/00035	0/950	0/00817	0/0001	0/944	0/00412	1/24402	0/954
F	سردخانه	-0/13650	0/984	-0/00852	0/989	-0/00053	0/993	-0/00852	0/0010	0/989	-0/01036	0/92874	0/993
	یخچالی	-0/16112	0/981	-0/01020	0/987	-0/00064	0/991	-0/01020	0/0010	0/987	-0/01272	0/91916	0/992
	محیط	-0/37483	0/950	-0/02721	0/972	-0/00196	0/984	-0/02722	0/0010	0/971	-0/03820	0/87321	0/982
TSS	سردخانه	0/15939	0/978	0/01635	0/965	0/00168	0/947	0/01635	0/0001	0/965	0/03001	0/78298	0/986
	یخچالی	0/17896	0/980	0/01971	0/970	0/00183	0/957	0/01810	0/0000	0/971	0/03130	0/80446	0/985
	محیط	0/30812	0/904	0/02799	0/863	0/00256	0/815	0/02800	0/0000	0/863	0/09522	0/56526	0/952
TA	سردخانه	-0/07151	0/976	-0/01973	0/981	-0/00541	0/979	-0/01973	0/0000	0/981	-0/01124	1/20721	0/978
	یخچالی	-0/10119	0/975	-0/03046	0/994	-0/00906	0/999	-0/03047	0/0010	0/994	-0/02880	1/02106	0/993
	محیط	-0/15752	0/978	-0/05573	0/978	-0/01901	0/961	-0/05573	0/0000	0/978	-0/03355	1/19625	0/976
RPI	سردخانه	-0/04494	0/988	-0/00705	0/991	-0/00110	0/992	-0/00705	0/0010	0/991	-0/00658	1/02492	0/990
	یخچالی	-0/05865	0/990	-0/00937	0/994	-0/00150	0/997	-0/00938	0/0010	0/994	-0/01003	0/97521	0/995
	محیط	-0/11511	0/979	-0/01992	0/978	-0/00344	0/974	-0/01992	0/0000	0/978	-0/01600	1/08092	0/977
pH	سردخانه	0/01531	0/929	0/00362	0/927	0/00085	0/924	0/003620	0/0001	0/927	0/00657	0/78414	0/948
	یخچالی	0/01997	0/998	0/00468	0/997	0/00110	0/996	0/004687	0/0010	0/997	0/00465	1/00286	0/997
	محیط	0/04594	0/877	0/01019	0/860	0/00226	0/842	0/010190	0/0001	0/860	0/03110	0/59839	0/945

جدول 3- مقادیر آماری به‌دست آمده از برازش مدل‌های درجه صفر، اول، دوم، تبدیل جزئی و ویبال بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی

	شرایط نگهداری	مدل درجه صفر		مدل درجه اول		مدل درجه دوم		مدل تبدیل جزء		مدل ویبال	
		Adj. R^2	RMSE	Adj. R^2	RMSE	Adj. R^2	RMSE	Adj. R^2	RMSE	Adj. R^2	RMSE
WL	سردخانه	0/941	0/243	0/996	0/091	0/931	0/398	0/979	0/097	0/980	0/085
	یخچالی	0/944	0/267	0/996	0/087	0/912	0/423	0/987	0/112	0/987	0/129
	محیط	0/985	0/121	0/982	0/111	0/865	0/765	0/946	0/213	0/984	0/123
*L**	سردخانه	0/988	0/086	0/989	0/074	0/989	0/083	0/989	0/097	0/986	0/102
	یخچالی	0/930	0/376	0/934	0/295	0/937	0/341	0/934	0/328	0/946	0/278
	محیط	0/864	0/756	0/891	0/543	0/914	0/432	0/891	0/519	0/952	0/174
*a**	سردخانه	0/941	0/298	0/916	0/401	0/886	0/544	0/916	0/375	0/969	0/154
	یخچالی	0/914	0/441	0/891	0/523	0/864	0/612	0/891	0/530	0/946	0/270
	محیط	0/880	0/734	0/837	0/642	0/758	0/801	0/837	0/602	0/932	0/291
*b**	سردخانه	0/697	0/912	0/754	0/763	0/804	0/687	0/967	0/143	0/873	0/499
	یخچالی	0/756	0/764	0/817	0/674	0/867	0/546	0/972	0/113	0/906	0/387
	محیط	0/753	0/732	0/828	0/657	0/887	0/531	0/980	0/097	0/909	0/378
ΔE	سردخانه	0/940	0/287	0/945	0/243	0/951	0/198	0/945	0/201	0/970	0/234
	یخچالی	0/811	0/511	0/820	0/897	0/830	0/647	0/820	0/709	0/914	0/344
	محیط	0/540	0/821	0/561	0/938	0/581	0/901	0/561	0/932	0/753	0/867
*h**	سردخانه	0/844	0/370	0/892	0/487	0/929	0/287	0/984	0/113	0/947	0/265
	یخچالی	0/848	0/310	0/901	0/376	0/939	0/343	0/969	0/165	0/946	0/271
	محیط	0/803	0/401	0/889	0/576	0/944	0/301	0/975	0/145	0/937	0/298
*C**	سردخانه	0/216	0/974	0/217	0/974	0/217	0/974	0/217	0/954	0/421	0/921
	یخچالی	0/979	0/095	0/602	0/687	0/610	0/783	0/602	0/784	0/594	0/873
	محیط	0/917	0/174	0/925	0/301	0/933	0/276	0/926	0/265	0/940	0/221
F	سردخانه	0/978	0/119	0/985	0/087	0/991	0/067	0/985	0/089	0/991	0/074
	یخچالی	0/975	0/127	0/983	0/091	0/988	0/087	0/983	0/091	0/989	0/072
	محیط	0/933	0/231	0/962	0/123	0/979	0/083	0/962	0/112	0/976	0/121
TSS	سردخانه	0/970	0/167	0/953	0/143	0/930	0/312	0/953	0/178	0/982	0/082
	یخچالی	0/973	0/174	0/960	0/138	0/943	0/275	0/961	0/221	0/980	0/080
	محیط	0/873	0/376	0/818	0/673	0/753	0/804	0/818	0/693	0/936	0/265
TA	سردخانه	0/968	0/145	0/975	0/142	0/972	0/124	0/974	0/109	0/971	0/128
	یخچالی	0/967	0/131	0/992	0/054	0/999	0/041	0/992	0/050	0/991	0/051
	محیط	0/971	0/114	0/970	0/101	0/948	0/165	0/970	0/115	0/969	0/116
RPI	سردخانه	0/984	0/083	0/988	0/091	0/991	0/083	0/988	0/085	0/987	0/089
	یخچالی	0/987	0/074	0/992	0/074	0/995	0/072	0/992	0/058	0/993	0/065
	محیط	0/973	0/114	0/970	0/126	0/965	0/169	0/971	0/103	0/970	0/124
pH	سردخانه	0/906	0/267	0/902	0/397	0/898	0/321	0/902	0/289	0/931	0/197
	یخچالی	0/998	0/032	0/996	0/065	0/944	0/319	0/996	0/048	0/996	0/049
	محیط	0/836	0/439	0/814	0/578	0/798	0/629	0/814	0/621	0/927	0/301

ضرایب معادلات سینتیکی (پارامترهای مدل) به‌همراه پارامترهای دقت مدل‌سازی در جداول 2 و 3 نشان داده شده است و بهترین مدل جهت پیش‌بینی تغییرات سینتیکی با کمک معیارهای R^2، Adj. R^2 و RMSE انتخاب گردید. همانطور که در جدول مشاهده می‌گردد، دو مدل درجه اول و ویبال دارای بیشترین ضریب R^2 و Adj. R^2 و کمترین RMSE است و در نتیجه بهترین توصیف را از رفتار سینتیکی خصیصه‌های فیزیکی و شیمیایی طی زمان نگهداری در شرایط مختلف دارند. مدل درجه اول اغلب برای توصیف تغییرات سینتیکی خصیصه‌های فیزیکی و شیمیایی بهترین مدل می‌باشد (Nannyonga *et al*., 2016)، همچنین محققان زیادی با استفاده از مدل ویبال نشان دادند که این مدل نسبت به سایر مدل‌ها دارای انعطاف‌پذیری بالایی جهت مدل‌سازی تغییرات سینتیکی هستند (Cardenas-Perez *et al*., 2017; Amodio *et al*., 2013; Quevedo *et al*., 2009; Dı´az *et al*., 2009).

نتایج برازش مدل‌های مختلف بر تغییرات افت وزن زالزالک طی نگهداری در شرایط مختلف نشان داد که مدل درجه اول (ضریب تبیین و RMSE به‌ترتیب برابر 0/996 و 0/091)، مدل درجه اول (ضریب تبیین و RMSE به‌ترتیب برابر 0/996 و 0/087) و مدل درجه صفر (ضریب تبیین و RMSE به‌ترتیب برابر 0/985 و 0/121) بهترین پیش‌بینی این تغییرات طی نگهداری در سردخانه، یخچال و محیط را داشت؛ مقادیر بالاتر k حاصل از مدل‌های مختلف در شرایط نگهداری در محیط نسبت به یخچال و یخچال نسبت به سردخانه نشان دهنده شیب بیشتر نمودار است که سبب رخداد سریع‌تر تغییرات می‌گردد. نتایج حاصل از برازش مدل‌های مختلف بر داده‌های تجربی حاکی از برتری مدل ویبال تحت شرایط مختلف نگهداری است. به‌طوریکه میزان ضریب تبیین و RMSE برای شرایط نگهداری در سردخانه، یخچال و محیط به‌ترتیب برابر 0/993 و 0/074، 992/ و 0/072، 0/982 و 0/121 بود. مقدار k_{wo} برابر 0/01036-، 0/01272- و 0/03820 نیز به‌ترتیب برای شرایط نگهداری در سردخانه، یخچال و محیط بدست آمد که نشان دهندۀ روند کاهشی سفتی بافت و نیز سرعت بیشتر این کاهش سفتی بافت در شرایط محیط نسبت به یخچالی و یخچالی نسبت به سردخانه است. نتایج برازش خصیصه‌های رنگی با مدل‌های سینتیکی مختلف نشان داد که مدل درجه دو (ضریب تبیین و RMSE به‌ترتیب برابر 0/992 و 0/083)، مدل ویبال (ضریب تبیین و RMSE به‌ترتیب برابر 0/959 و 0/278) و مدل ویبال (ضریب تبیین و RMSE به‌ترتیب برابر 0/963 و 0/174) بهترین توصیف از خصیصه L^* به‌ترتیب برای شرایط نگهداری در سردخانه، یخچال و محیط داشتند. این درحالی است که مدل ویبال و تبدیل جزء به‌عنوان بهترین مدل در توصیف تغییرات خصیصه‌های a^* و b^* انتخاب گردید. مقدار ضریب تبیین و RMSE مدل ویبال برای خصیصه a^* برای شرایط نگهداری در سردخانه، یخچال و محیط به‌ترتیب برابر 0/977 و 0/499، 0/959 و 0/387، 0/949 و 0/378 محاسبه گردید؛ همچنین مقدار ضریب تبیین و RMSE برابر 0/975 و 0/143، 0/979 و 0/113، 0/985 و 0/097 برای برازش مدل تبدیل جزء بر داده‌های خصیصۀ b^* به‌ترتیب تحت شرایط نگهداری در سردخانه، یخچال و محیط حاصل آمد. از نتایج برازش می‌توان اینطور استنباط کرد که چون ضریب تبیین در تمامی خصیصه‌ها بالای 0/945 است؛ بنابراین همبستگی مناسبی بین مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر تجربی وجود دارد و در نتیجه مدل‌های سینتیکی می‌تواند تغییرات این خصیصه‌های رنگی را به خوبی توصیف نماید. برازش مدل‌های مختلف بر سایر خصیصه‌های رنگی نیز صورت پذیرفت؛ بهترین برازش برای تغییرات خصیصه‌های ΔE و h^* به‌ترتیب توسط مدل ویبال و تبدیل جزء برای هر سه شرایط نگهداری صورت گرفت و مدل‌های درجه دو، درجه صفر و ویبال نیز توانستند به خوبی داده‌های حاصل از خصیصه C^* را به ترتیب برای شرایط نگهداری در سردخانه، یخچال و محیط برازش نمایند. مقادیر بالاتر k نشان‌دهنده سرعت بیشتر تغییرات است که عمدتاً در نگهداری در محیط رخ می‌دهد؛ همچنین علامت منفی در مقدار k برای برخی خصیصه‌ها به معنی رفتار کاهشی (شیب خطی منفی) آن خصیصه است.

مدل ویبال به سبب ضریب تبیین بیشتر از 0/952 در تمامی شرایط نگهداری به‌عنوان بهترین مدل برای توصیف تغییرات خصیصه میزان مواد جامد محلول انتخاب گردید. همانطور که انتظار می‌رفت مقدار k حاصل از برازش با افزایش دما بیشتر شد؛ به‌طوریکه ثابت ویبال (k_{WO}) برای شرایط نگهداری در محیط (0/09522 در روز) بیشتر از سه برابر مقدار این ثابت برای نگهداری در شرایط سردخانه (0/03001 در روز) محاسبه شد؛ نتایج حاصل از برازش مدل‌های مختلف نشان داد که بهترین مدل برای پیش‌بینی داده‌های حاصل از اندازه‌گیری اسیدیته قابل تیتر در شرایط نگهداری سردخانه‌ای، یخچالی و محیط به‌ترتیب مدل‌های درجه اول (ضریب تبیین و RMSE به‌ترتیب برابر 0/981 و 0/142)، درجه دو (ضریب تبیین و RMSE به‌ترتیب برابر 0/999 و 0/041) و درجه اول (ضریب تبیین و RMSE به‌ترتیب برابر 0/978 و 0/101) می‌باشد. مدل‌های ویبال، درجه اول و ویبال نیز بهترین پیش‌بینی از تغییرات pH را برای شرایط نگهداری سردخانه‌ای، یخچالی و محیط داشت. Amodio و همکاران (2012) مدل درجه اول را به عنوان بهترین مدل در پیش‌بینی تغییرات خصیصه‌های شیمیایی گزارش نمودند. در نهایت مدل‌های درجه دو (ضریب تبیین و RMSE به‌ترتیب برابر 0/992 و 0/083)، درجه دو (ضریب تبیین و RMSE به‌ترتیب برابر 0/997 و 0/072) و درجه اول (ضریب تبیین و RMSE به‌ترتیب برابر 0/978 و 0/126) بهترین توصیف را برای داده‌های شاخص رسیدگی به‌ترتیب در شرایط نگهداری سردخانه‌ای، یخچالی و محیط داشت. همانطور که مشاهده

گردید، مدل‌های سینتیکی توانستند با موفقیت و دقت نسبتاً بالایی تغییرات فیزیکی و شیمیایی زالزالک را طی نگهداری در شرایط مختلف پیش‌بینی نمایند.

از آنجایی‌که مدل درجه اول توصیف نسبتاً خوبی برای همه خصیصه‌های فیزیکی و شیمیایی داشت؛ با کمک ثابت سرعت تغییرات حاصل از مدل درجه اول می‌توان نیمه عمر تغییرات کیفی مختلف را محاسبه نمود (جدول 4). نیمه عمر در حقیقت مدت زمانی است که طول می‌کشد تا یک خصیصه 50 درصد کاهش یا افزایش یابد. نیمه عمر اطلاعات جامعی از تغییرات خصیصه‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی در اختیار قرار می‌دهد.

جدول 4- نیمه عمر ($t_{1/2}$) بر اساس خصوصیت فیزیکی و شیمیایی.

خصیصه فیزیکی وشیمیایی	نیمه عمر (روز)		
	سردخانه	یخچال	محیط
WL	7/19	6/61	7/94
F	81/35	67/97	25/47
TSS	42/39	35/17	24/76
TA	35/12	22/75	12/44
RPI	98/38	73/94	34/79

همان‌طور که در جدول 4 مشاهده می‌گردد، نیمه عمر بسته به نوع خصویات فیزیکی و شیمیایی بین 7/19 تا 98/38 روز متغیر است و با افزایش دمای نگهداری (شرایط نگهداری در محیط) نیمه عمر نیز کاهش پیدا می‌کند؛ به‌عنوان مثال نیمه عمر تغییرات بافتی در شرایط نگهداری در سردخانه 81/35 روز است در حالی‌که نیمه عمر این خصیصه در شرایط نگهداری محیط 25/47 روز می‌باشد. علت اعداد متفاوت برای نیمه عمر خصیصه افت وزن نیز به سبب عدم برازش مناسب مدل درجه اول با داده‌های تجربی است.

جدول 5- اطلاعات رگرسیونی برازش معادله آرنیوس (مدل وابستگی دمایی) برای خصوصیات فیزیکی و شیمیایی

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی	$k_{1°C}$ (در روز)	Ea(j/mol)	R^2
WL	0/09514	73241/2	0/8213
*L**	-0/00620	21423/2	0/8754
*a**	0/01431	72321/5	0/9693
*b**	-0/02031	43265/1	0/8754
ΔE	-0/00439	59321/9	0/8341
*h**	-0/02271	62391/4	0/9645
*C**	0/00032	51092/5	0/8145
F	-0/00849	68432/1	0/9723
TSS	0/01630	67241/2	0/9894
TA	-0/01981	58241/2	0/9782
RPI	-0/00701	67342/9	0/9862
pH	0/00374	21328/4	0/8439

از نتایج فوق می‌توان دریافت که در شرایط مختلف نگهداری، بین میزان ثابت واکنش (k) برای خصیصه‌های مختلف اختلاف وجود دارد. به منظور ارزیابی رابطه بین ثابت واکنش و دمای نگهداری، از برازش این داده‌ها با مدل آرنیوس و با کمک روش رگرسیونی غیرخطی استفاده شد. معادله آرنیوس برای سینتیک تغییرات وابسته به دمای خصیصه‌های فیریکی و شیمیایی به‌کار برده شد تا مقادیر انرژی فعال‌سازی (Ea) طی نگهداری تعیین شود (جدول 5). همچنین با استفاده از یک مدل غیرخطی مقادیر k در دمای مرجع 1 درجه سانتی‌گراد نیز محاسبه شد. انرژی فعال‌سازی بیشتر نشان‌دهنده وابستگی بیشتر نرخ واکنش به دما است. ضرایب R^2 بیشتر از

0/9645 خصیصه‌های a^*، h^*، F، TSS، TA و RPI نشان‌دهنده مناسب بودن معادله آرنیوس برای نشان دادن وابستگی دمایی است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که خصیصه‌های نظیر افت وزن، pH ، میزان مواد جامد، خصیصه‌های a^* و C^* با گذشت زمان نگهداری و تغییر شرایط نگهداری بطور معناداری ($p<0.05$) افزایش می‌یابد؛ که این افزایش برای شرایط نگهداری در محیط نسبت به یخچالی و آن هم نسبت به شرایط نگهداری در سردخانه به‌طور معناداری ($p<0.05$) بیشتر است. علت این امر نیز دمای بالاتر و رطوبت کمتر در شرایط نگهداری محیط است که باعث تسریع تغییرات بعدی می‌گردد؛ این در حالی است که سایر خصیصه‌ها نظیر سفتی بافت، خصیصه‌های L^*، b^*، h^*، ΔE، TA و RPI با تغییر زمان و شرایط نگهداری، به‌طور معناداری($p<0.05$) افزایش یافت. این نتایج همچنین نشان داد که همبستگی بین خصیصه‌های فیزیکی و شیمیایی وجود دارد. نتایج بررسی تغییرات خصیصه‌های هندسی طی نگهداری بیانگر این مطلب بود که اگرچه تغییرات برخی از خصیصه‌های هندسی نظیر قطر میانگین هندسی (Dg)، تغییرات قطر اصلی (MDC) و ضریب کرویت (φ) معنادار($p<0.05$) بود ولی با این وجود خصیصه‌های هندسی معیار قدرتمند و مناسبی برای بررسی تغییرات طی نگهداری زالزالک نمی‌باشد. نتایج برازش مدل‌های سینتیکی مختلف بر داده‌های تجربی بیانگر توصیف مناسب این مدل‌ها از رفتار سینتیکی خصیصه‌های فیزیکی و شیمیایی طی زمان نگهداری در شرایط مختلف می‌باشد. در این میان دو مدل درجه اول و ویبال دارای بیشترین ضریب R^2 و Adj. R^2 و کمترین RMSE بودند و در نتیجه بهترین مدل برای برازش داده‌های اکثر خصیصه‌های فیزیکی و شیمیایی انتخاب گردید. مقدار مطلق ثابت سرعت (k) در تمامی مدل‌ها و برای همه خصیصه‌های فیزیکی و شیمیایی در شرایط نگهداری محیط بزرگتر از شرایط نگهداری یخچالی و آن نیز بزرگتر از شرایط نگهداری در سرخانه بود که نشان‌دهنده سرعت بیشتر تغییرات و نیز شیب بیشتر نمودار تغییرات طی نگهداری محیط نسبت به یخچالی و آنهم نسبت به سردخانه‌ای است. در ادامه نیمه عمر بر اساس هریک از خصیصه‌های فیزیکی و شیمیایی و با استفاده از ثابت سرعت معادله درجه اول محاسبه گردید. و وابستگی دمایی با معادله آرنیوس مشخص گردید.

تشکر و قدردانی

مطالعه حاضر حاصل بخشی از طرح‌های پژوهشی مصوب گروه علوم و صنایع غذایی دانشگاه زنجان مورخ 1398/02/30 با عنوان "استفاده از سیستم ماشین بینایی (CVS) جهت طبقه‌بندی، شناسایی، بررسی تغییرات طی نگهداری، رسیدگی و فرآوری ازگیل، زالزالک و نخود فرنگی" و مورخ 1398/04/10 با عنوان "خصوصیات فیزیکی، شیمیایی، بصری (پردازش تصویر)، آئرودینامیکی، هیدرودینامیکی میوه‌های ایرانی تحت شرایط مختلف فراوری و نگهداری" می‌باشد.

منابع

Afsharnia, F., Mehdizadeh, S., Ghaseminejad, M., & Heidari, M. (2017). The effect of dynamic loading on abrasion of mulberry fruit using digital image analysis. *Imformation Processing In Agriculturale, 4*, 291-299.

Amodio, M., Derossi, A., & Colelli, G. (2013). Modelling sensorial and nutritional changes to better define quality and shelf life of fresh-cut melons. *Journal of Agricultural Engineering, 44*(1), 38-45.

Amodio, M., Dollo, L., Rinaldi, R., & Colelli, G. (2012). Degradation patterns for external and nutritional quality parameters of fresh-cut “Cantaloupe” melons. *Acta Horticulturae, 948*, 641-648.

Aral, S., & Vildan Bese, A. (2016). Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus spp.*): Effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. *Food Chemistry, 210*, 577–584.

Arzate-Vazquez, I., Chanona-Perez, J., Perea-Flores, M., Calderon-Domı´nguez, G., Moreno-Armendariz, M., & Gutierrez-Lopez, G. (2011). Image processing applied to classification of avocado variety Hass (*Persea americana* Mill) during the ripening process. *Food and Bioprocess Technology, 4*, 1307-1313.

Ashournezhad, M., & Ghasemnezhad, M. (2012). Effects of cellophane-film packaging and cold storage on the keeping quality and storage life of loquat fruit (*Eriobotrya japonica*). *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology, 7*(2), 95-102.

Avila, I., & Silva, C. (1999). Modelling kinetics of thermal degradation of colour in peach puree. *Journal of Food Engineering, 39*(2), 161-166.

Billy, L., Mehinagic, E., Royer, G., Renard , C., Arvisenet , G., & Prost, C. (2008). Relationship between texture and pectin composition of two apple cultivars during storage. *Postharvest Biology and Technology, 47*, 315-324.

Cardenas-Perez, S., Chanona-Perez, J., Mendez-Mendez, J., Calderon-Domınguez, G., Lopez-Santiago, R., Perea-Flores, M., & Arzate-Vazquez, I. (2017). Evaluation of the ripening stages of apple (*Golden Delicious*) by means of computer vision system. *Biosystems Engineering, 159*, 46-58.

Chen, C., & Ramaswamy, H. (2002). Color and Texture Change Kinetics in Ripening Bananas. *LWT- Food Science and Technology, 35*(5), 415-419.

Chowdhury, S., & Das Saha, P. (2011). Comparative analysis of linear and nonlinear methods of estimating the pseudo-second-order kinetic parameters for sorption of malachite green onto pretreated rice husk. *Bioremediation Journal, 15*, 181-188.

Corradini, M., & Peleg, M. (2007). A Weibullian model for microbial injury and mortality. *International Journal of Food Microbiology, 119*(3), 319-328.

Derili gharjalar, S., Hassanpour, H., & Farokhzad, A. (2017). Pomological characteristics of some hawthorn genotypes in West Azerbaijan province. *Iranian Journal of Horticultural Science, 48*(3), 689-700.

Dhakala, S., Balasubramaniam, V., Ayvaza, H., & Rodriguez-Saona, L. (2018). Kinetic modeling of ascorbic acid degradation of pineapple juice subjected to combined pressure-thermal treatment. *Journal of Food Engineering, 224*, 62-70.

Distefano, G., Casas, G., Caruso, M., Todaro, A., Rapisarda, P., Malfa, S., & Tribulato, E. (2009). Physiological and molecular analysis of the maturation process in fruits of clementine mandarin and one of its late-ripening mutants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 57*, 7974–7982.

Froehlicher, T., Hennebelle, T., Martin-Nizard, F., Cleenewerck, P., Hilbert, J., Trotin, F., & Grec, S. (2009). Phenolic profiles and antioxidative effects of Hawthorn cell suspensions, fresh fruits, andmedicinal dried parts. *Food Chemistry, 15*, 897-903.

Gordon, E., & Barrett, D. (2012). Pectin methylesterase activity and other factors affecting pH and titratable acidity in processing tomatoes. *Food Chemistry, 132*, 915-920.

Guadarrama, A., & Andrade, S. (2012). Physical, chemical and biochemical changes of Sweetsop (*Annona squamosa* L.) and golden apple (*Spondias citherea Sonner*) fruits during ripening. *Journal of Agricultural Science and Technology, 2012*, 1148-1157.

Gupte, S., El-Bisi, H., & Francis, F. (1964). Kinetics of thermal degradation of chlorophyll in spinach puree. *Journal of Food Science, 29*(4), 379–382.

Hashim, N., Janius, R., Baranyai, L., Rahman, R., Osman, A., & Zude, M. (2012). Kinetic model for colour changes in bananas during the appearance of chilling injury symptoms. *Food and Bioprocess Technology*, 2952-2963.

Helrich, K. (1990). AOAC Official Methods of Analysis. *Official Methods of Analysis of the AOAC International*.

Jahangiri-Saleh, M., Hassan-Beygi, S., Aboonajmi, M., & Lotfi, M. (2017). Prediction of cucumber acoustic response, crispnessindex and firmness using artificial neural networks. *Food Science and Technology, 14*, 265-276.

Johnson, J., Bomser, J., Scheerens, J., & Giusti, M. (2011). Effect of black raspberry (*Rubus occidentalis* L.) extract variation conditioned by cultivar, production site, and fruit maturity stage on colon cancer cell proliferation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 59*, 1638–1645.

Khoshnam, F., Tabatabaeefar, A., Ghasemi Varnamkhasti, M., & Borghei, A. (2007). Mass modeling of pomegranate fruit with some physical characteristics. *Scientia Horticulturae, 114*(1), 21–26.

Kirakosyan, A., Seymour, E., Kaufman, P., Warber, S., Bolling, S., & Chang, S. (2003). Antioxidant capacity of polyphenolic extracts from leaves of *Crataegus laevigata* and *Crataegus monogyna* (hawthorn) subjected to drought and cold stress. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 51*, 3973–3976.

Kwok, C.-Y., Wong, C. N.-Y., Yau, M. Y.-C., Poon, C.-W., Seto, S.-W., Lam, T.-Y., & Chan, S.-W. (2010). Consumption of dried fruit of Crataegus pinnatifida (hawthorn) suppresses high-cholesterol diet-induced hypercholesterolemia in rats. *Journal of Functional Foods, 2*(3), 179-186.

Labuza, P. (1979). A Theoretical Comparison of Losses in Foods under Fluctuating Temperature Sequences. *Journal of food science, 44*(4), 1162-1168.

Levenspiel, O. (1972). Interpretation of batch reactor data. In *Chemical Reaction Engineering* (second ed., pp. 41-47). New York.

Li, W.-Q., Hu, Q.-P., & Xu, & J.-G. (2015). Changes in physicochemical characteristics and free amino acids of hawthorn (*Crataegus pinnatifida*) fruits during maturation. *Food Chemistry, 175*, 50–56.

Liu, J.-L., Yuan, J.-F., & Zhang, & Z.-Q. (2010). Microwave-assisted extraction optimised with response surface methodology and antioxidant activity of polyphenols from hawthorn (*Crataegus pinnatifida Bge*.) fruit. *International Journal of Food Science & Technology, 45*(11), 2400-2406.

Liu, P., Kallio, H., Lv, D., Zhou, C., Ou, S., & Yang, B. (2010). Acids, sugars, and sugar alcohols in Chinese hawthorn (*Crataegus spp.*) fruits. *Journal of Agricultural of Food Chemistry, 58*, 1012–1019.

Liu, S., Chang, X., Liu, X., & Shen, Z. (2016). Effects of pretreatments on anthocyanin composition, phenolics contents and antioxidant capacities during fermentation of hawthorn (*Crataegus pinnatifida*) drink. *Food Chemistry, 212*, 87–95.

Maskan, M. (2001). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering, 48*(2), 169-175.

Mohammadi, V., Kheiralipour, K., & Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2015). Detecting maturity of persimmon fruit based on image processing technique. *Scientia Horticulturae, 184*, 123–128.

Nannyonga, S., Bakalis, S., Andrews, J., Mugampoza, E., & Gkatzionis, K. (2016). Mathematical modelling of color, texture kinetics and sensory attributes characterisation of ripening bananas for waste critical point determination. *Journal of Food Engineering*, 190(5), 205-210.

Nisha, P., Singhal, R., & Pandit, A. (2005). study on degradation kinetics of riboflavin in spinach (*Spinacea oleracea* L.). *Journal of Food Engineering, 67*(4), 407-412.

Nordey, T., Léchaudel, M., Génard, M., & Joas, J. (2014). Spatial and temporal variations in mango colour, acidity, and sweetness in relation to temperature and ethylene gradients within the fruit. *Journal of Plant Physiology, 171*(17), 1555-1563.

Odriozola-Serrano, I., Soliva-Fortuny, R., & Martin-Belloso, O. (2009). Influence of storage temperature on the kinetics of the changes in anthocyanins, vitamin c, and antioxidant capacity in fresh-cut strawberries stored under high-oxygen atmospheres. *Journal of Food Science, 74*, 184-191.

Oms-Oliu, G., Odriozola-Serrano, I., Soliva-Fortuny, R., & Martin-Belloso, O. (2009). Use of Weibull distribution for describing kinetics of antioxidant potential changes in fresh-cut watermeon. *Journal of Food Engineering, 95*, 99-105.

Ozcan, M., Hacıseferogulları, H., Marakoglu, T., & Arslan, D. (2005). Hawthorn (*Crataegus* spp.) fruit: some physical and chemical properties. *Journal of Food Engineering, 69*, 409-413.

Paull, R. (1999). Effect of temperature and relative humidity on fresh commodity quality. *Postharvest Biology And Technology, 15*(3), 263-277.

Pinheiro, J., Alegria, C., Abreu, M., Gonçalves, E., & Silva, C. (2013). Kinetics of changes in the physical quality parameters of fresh tomato fruits (*Solanum lycopersicum*, cv. 'Zinac') during storage. *Journal of Food Engineering, 114*, 338–345.

Pittler, M., Schmidt, K., & Ernst, E. (2003). Hawthorn extract for treating chronic heart failure: Meta-analysis of randomized trials. *The American Journal of Medicine, 114*, 665–674.

Qi, X., Li, Z., & Xu, S. (2005). Relationship between soluble sugars and peel pigments in hawthorn fruit. *Journal of Fruit Science, 22*(1), 81–83.

Quevedo , R., Dı´az, O., Ronceros, B., Pedreschi, F., & Aguilera, J. (2009). Description of the kinetic enzymatic browning in banana (*Musa cavendish*) slices using non-uniform color information fromdigital images. *Food Research International, 42*, 1309e1314.

Quevedo, R., Dıaz, O., Caqueo, A., Ronceros, B., & Aguilera, J. (2009). Quantification of enzymatic browning kinetics in pear slices using non-homogenous L* color information from digital images. *LWT - Food Science and Technology, 42*, 1367-1373.

Razavi, F., Roghayeh, M., Rabiei, V., Soleimani Aghdam, M., & Soleimani, A. (2018). Glycine betaine treatment attenuates chilling injury and maintains nutritional quality of hawthorn fruit during storage at low temperature. *Scientia Horticulturae, 233*, 188-194.

Remini, H., Mertz, C., Belbahi, A., Achir, N., Dornier, M., & Madani, K. (2015). Degradation kinetic modelling of ascorbic acid and colour intensity in pasteurised blood orange juice during storage. *Food Chemistry, 173*, 665–673.

Rigelsky, J., & Sweet, B. (2002). Hawthorn: pharmacology and therapeutic uses. *American Journal of Health-System Pharmacy, 59*(5), 417-22.

Rodrigues, S., Calhelha, R., Barreira, J., Duenas, M., Carv-alho, A., Abreu, R., & Ferreira, I. (2012). Crataegus monogyna buds and fruits phenolic extracts: growth inhibitory activity on human tumour cell lines and chemical characterization byHPLC–DAD–ESI/MS. *Food Research International, 49*, 516-523.

Rop , O., Sochor, J., Jurikova, T., Zitka, O., Skutkova, H., Mlcek, J., & Kizek, R. (2011). Effect of five different stages of ripening on chemical compounds in medlar (*Mespilus germanica* L.). *Molecules, 16*, 74-91.

Salam, O., Sleem, A., & Shafee, N. (2012). Effect of Crataegus extract on carbon tetrachloride-induced hepatic damage. *Comparative Clinical Pathology, 21*, 1719–1726.

Salvador, A., Arnal, L., Besada, C., Larrea, V., Quiles, A., & Pérez-Munuera, I. (2007). Physiological and structural changes during ripening and deastringency treatment of persimmon fruit cv. 'Rojo Brillante'. *Postharvest Biology Technology, 46*, 181-188.

Sessiz, A., Esgici, R., & Kizil, S. (2007). Moisture-dependent physical properties of caper (*Capparis* ssp.) fruit. *Journal of Food Engineering, 79*, 1426–1431.

Shin, S., & Bhowmik, S. (1995). Thermal kinetics of color changes in pea puree. *Journal of Food Engineering, 24*(1), 77-86.

Singh, D., Goswami, T., & Chourasia, M. (2006). Physical properties of two popular Indian potato varieties. *Journal of Food Process Engineering, 21*, 301–316.

Tankanowa, R., Tamer, H., Streetman, D., Smith, S., Welton, J., Annesley, T., & Bleske, B. (2003). Interaction study between digoxin and apreparation of Hawthorn (Crataegus oxyacantha). *The Journal of Clinical Pharmacology, 43*(6), 637-642.

Vélez-Rivera, N., Blasco, J., Chanona-Pérez, J., Calderón-Domínguez, G., Perea-Flores, M., Arzate-Vázquez, I., & Farrera-Rebollo, R. (2014). Computer Vision System Applied to Classification of "Manila" Mangoes During Ripening Process. *Food and Bioprocess Technology*, *7*(4), 1183–1194.

Wan, P., Toudeshki, A., Tana, H., & Ehsani, R. (2018). A methodology for fresh tomato maturity detection using computer vision. *Computers and Electronics in Agriculture, 146*, 43-50.

Wang, J. (2004). Mechanical properties of pear as a function of location and orientation. *International Food Properties, 7*, 155–164.

Wanitchang, J., Terdwongworakul, A., Wanitchang, P., & Noypitak, S. (2010). Maturity sorting index of dragon fruit: *Hylocereus* polyrhizus. *Journal of Food Engineering, 100,* 409–416.

Weemaes, C., Ooms, V., Van Loey, A., & Hendrickx, M. (1999). Kinetics of chlorophyll degradation and color loss in heated broccoli juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 47*(6), 2404–2409.

Zhang, Z., Ho, W., Huang, Y., & Chen, Z. (2002). Hypocholesterolemic activity of hawthorn fruit is mediated by regulation of cholesterol-7alphahydroxylase and acylCoA: Cholesterol acyltransferase. *Food Research International, 35,* 885–891.

Zheng, H., Kim, Y., & Chung, S. (2012). A profile of physicochemical and antioxidant changes during fruit growth for the utilisation of unripe apples. *Food Chemistry, 131*, 106–110.

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 16, No. 5, Dec- Jan 2021, p. 507-523

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 16، شماره 5، آذر - دی 1399، ص. 523-507

Evaluation of physicochemical characterization of hawthorn (*Crataegus pinnatifida*) during various storage conditions and modeling of changes using kinetic models

M. Zandi[1*], A. Ganjloo[2], M. Bimakr[2]

Received: 2019.09.01
Accepted: 2019.12.01

Introduction: Hawthorn (*Crataegus pinnatifida*), belonging to the Rosaceae family, consists of small trees and shrubs. The color of the ripe fruit varied from yellow, through green to red and on to dark purple. Most of the species ripen their fruit in early to mid-autumn. Beneficial effects of hawthorn fruit extracts have been confirmed by various studies. Pharmacological data showed that hawthorn fruit and its preparations enhance myocardial contraction and conductivity, protect against ischemia. They have a sedative action, a protective effect against arrhythmia and increase of coronary vessel flow. They have also positive effects on the cardiovascular system. Hawthorn is one of the most widely consumed horticultural products, either in fresh or processed form. It is also an important component of many processed food products because of its excellent flavor, attractive color and high content of many macro- and micro-nutrients. Uncertain storage conditions lead to considerable quality loss in hawthorn fruits, which affect their consumer acceptability. Properties such as color, firmness and moisture provide valuable information for the monitoring of quality changes in postharvest fruits because of their reliability and rapid and easy measurement. These changes are consequences of many biochemical and physiological processes that occur during fruit ripening, such as respiration and transpiration. In addition, these changes depend on the external conditions to which the fruit is exposed. To estimate changes in fruit quality as a function of storage conditions, the evolution of certain quality-indicative properties such as color, firmness or weight can be used to provide related information on the quality grade of the product stored. Kinetic models can be used as tools to describe quantitative physicochemical changes in foods during processing. Kinetic models can be linear or non-linear forms of rate law equations. The rate process of food constituents is usually defined by zero, first or second order kinetics.

Method and material: In this study, changes in physicochemical characteristics associated with fruit quality were investigated during various hawthorn fruit storage conditions include: cold (1ºC and RH=90%), refrigerator (10 ºC and RH=85%) and room conditions (25 ºC and RH=60%). Color quality parameters (L^*, a^*, b^*, C^*, h^* and ΔE), geometrical parameters, weight loss, firmness, total soluble solid (TSS), pH, titratable acidity (TA) and ripening index (RPI) were the measured factors. Different mathematical models were successfully proposed and adjusted to represent the change in physicochemical properties as a function of storage temperature. Among various kinetics model, five models (Zero-order, First-order, Second-order, Fractional conversion and Weibull models) were fitted to experimental data and model parameters in equations were determined by multiple regression analysis.

Result and discussion: Storage of hawthorn fruits at different temperature affected their color (L^*, a^*, b^*, C^*, h^* and ΔE), geometrical, physical (weight loss, firmness) and chemical properties (TSS, pH, TA and RPI). Storage at all conditions had significant impact on the physicochemical parameters analyzed (except some geometrical characteristics). Significant alterations in hawthorn color, firmness and weight loss were observed. The firmness, titratable acidity, pH, ripening index, color characteristics (except a^* and C^*) decreased while weight loss, total soluble solid, a^* and C^* increased significantly ($p<0.05$). Hawthorn stored at low temperatures revealed a delay on quality reduction reactions in terms of color, firmness and weight loss. The results indicated that the First-order and Weibull kinetic models provided the best prediction of the changes in physicochemical parameters. The storage temperature effect was successfully described by the Arrhenius law. Understanding the mechanisms in which these conditions affect the quality changes processes is of great importance because it allows their appropriate modification to maintain quality and maximize storage time. The outcomes of this study provide additional and useful information for hawthorn fruits under various storage conditions.

Keywords: Hawthorn, Storage conditions, Kinetic modeling, Arrhenius model, Physicochemical characteristics.

1. Assistant Professor, Department of Food Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran
2. Associate Professor, Department of Food Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran
(* Corresponding author. E-mail: zandi@znu.ac.ir)